

博士学位論文審査要旨

2013年7月23日

論文題目：O/W エマルション圧延時の油導入メカニズム解明と圧延潤滑性及び表面性状の制御可能性に関する研究

学位申請者： 中西 裕信

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 松岡 敬

副査： 理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 理工学研究科 准教授 平山 朋子

要 旨：

圧延では冷却や潤滑を目的として、水に油が分散した O/W エマルション圧延油が多用されている。近年、圧延製品の表面品質に対する要求や、製造コストダウン、エネルギー削減への対応が必要となっており、表面品質改善、圧延荷重低減を目的とした潤滑技術の向上が切望されている。本論文では2種類の評価手法を考案し、理解が十分でないエマルション圧延の潤滑メカニズムの解明に取り組むとともに、実圧延における潤滑及び表面性状の制御可能性について検討している。

本論文は6章から構成されている。1章では本論文の概要、研究背景について述べている。

2章では、光干渉システムを備えたディスクオンボール試験機を用い、エマルション圧延を模擬した評価手法を考案し、接触部の油膜形成挙動を調査している。ディスクに付着する油分の過不足によって、油膜形成に与える油滴引き込みの影響が変化することや、水にも油膜厚減少効果があることを見出している。また、入口部の逆流現象も影響することを実験と解析によって明らかにしている。

3章では実圧延におけるロールバイトの導入油膜厚測定を可能とするトレーサ法を新たに考案し、エマルション濃度、粒径、圧延速度が導入油膜形成に与える影響を初めて定量的に示している。

4章ではロール上のプレートアウト油膜厚測定により、エマルション性状や圧延条件がプレートアウト油膜に与える影響を示している。さらに、3章で得た導入油膜厚との比較により、プレートアウトが導入油膜形成に与える影響が速度によって変化していることを見出している。

5章では実圧延における潤滑性、表面性状制御の可能性について調べている。様々な圧延実験からエマルション性状によって潤滑性や表面性状の制御が可能であることを示すと共に、速度増加が制御に有利であることを明らかにしている。さらに、圧延においても水の油膜除去による潤滑性や表面性状の制御が可能であることや、界面活性剤によって効果を増大できることを見出している。従来は油条件に着目した検討が中心であったが、水の存在も無視できないことを明らか

にしている。

6章では各章を総括し実圧延への展開について述べている。

本論文は、新たな手法によって潤滑メカニズムを解明し、圧延における潤滑性、表面性状の制御可能性を示した研究であり、操業指針や圧延油設計指針として圧延業界の課題解決へ貢献が期待できるものであり工学的に評価できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2013年7月23日

論文題目：O/W エマルション圧延時の油導入メカニズム解明と圧延潤滑性及び表面性状の制御可能性に関する研究

学位申請者： 中西 裕信

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 松岡 敬

副査： 理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 理工学研究科 准教授 平山 朋子

要 旨：

本論文提出者は、大阪大学基礎工学部合成化学科を卒業後、大阪大学大学院基礎工学研究科化学系専攻を修了し、株式会社神戸製鋼所に入社され、2010年4月同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学され、2013年3月に退学されている。

本論文の主たる内容は、トライボロジストに2編の論文が掲載され、また、*Material transactions* に一編が論文受理され公表の予定であり、十分な評価を受けている。

2013年7月18日午後4時30分より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに、講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。なお、ドイツ語に関しては十分な能力を有すると認定されており、また英語に関しては英語の資格試験にも合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： O/W エマルション圧延時の油導入メカニズム解明と圧延潤滑性及び表面性状の制御可能性に関する研究

氏名： 中西 裕信

要旨：

自動車、船などの大型製品から飲料缶などの身近な製品まで様々な用途に使用されている金属板は圧延によって製造される。圧延は金属加工方法の一つであり、2つあるいは複数のロール間に金属を通過させることにより、板だけでなく棒、線、管、型材など様々な形状に加工する方法である。また、圧延によって製造される金属種は、鋼、アルミニウム、銅、チタンなどがあり、さらに各々に合金も存在するため多種多様である。そして、通常、圧延機にはロールの冷却や潤滑等の要求に応じて、ロールあるいは板に対し複数のスプレーから水や油が供給されている。

一方、近年、圧延製品の表面品質に対する国内ユーザーからの要求はますます高まっている。また、国内外のメーカーとの競争が激化する中で優位に立つためには、コスト競争への対応を避けることはできない。加えて、国内の電力需給問題の中で使用エネルギーの削減も必要となっている。このような圧延を取り巻く環境に対し、表面不良防止、表面品質制御、圧延時荷重低減等を目的とした圧延潤滑技術のレベルアップが切望されている。

圧延油の使用方法については大きく分けて2種類ある。一つは、アルミニウムや銅板の冷間圧延などで行われているニート圧延である。これは、基油に各種添加剤を混ぜた圧延油をそのまま使用する圧延方法である。ニート圧延は油単体を取り扱うため管理が容易で、高い潤滑性を発現する事が出来るが、冷却能力はエマルションよりも低く、残油、噛み込み性、火災など様々なデメリットがある。

もう一つは、水の冷却作用と油の潤滑作用を期待した水系圧延油である。鋼の冷間圧延やアルミニウムの熱間圧延などで使用されている。通常、水系圧延油は、水に油を数%分散させた Oil in Water (以下、O/W)型のエマルション圧延油が使用されている。このエマルションを用いた圧延潤滑では、大きく分けて2種類の潤滑機構が重要と考えられている。

一つは境界潤滑効果である。これは金属板が変形する過程で、ロールと金属板の接触/非接触部における潤滑効果を意味するものである。この境界潤滑効果の把握には、ミクロな視点での圧延油中の添加剤の挙動理解が重要であり、これまでも様々な分析手法を用いて現象解明が試みられている。

もう一つは流体潤滑効果である。これは、圧延時のロールと金属板間（以下、ロールバイト）に生じる油膜厚（以下、導入油膜厚）に着目したものである。流体潤滑効果を理解するには、基油自体の粘性やエマルションの特性（油分濃度、粒径、乳化安定性）に加え、エマルションの供給方法も重要である。実際に、圧延では使用方法、供給方法によって圧延潤滑性や製品品質などを制御する試みが行われている。また、導入油膜生成挙動の把握は、ロールバイトでの潤滑挙動や加工後の表面性状を理解する上で重要な課題であると認識され、様々な検討が多数行われている。しかし、実際に O/W エマルション圧延時の導入油膜厚を測定した例や、基礎的な検討においても圧延の潤滑状態を考慮した例はない。また、金属表面に形成する油膜（以下、プレートアウト）やエマルション中の油滴引き込み現象等を個別に調査した例はあるが、両現象の関係やそれらが導入油膜厚に与える影響など未だ解明されていない部分も多い。

そこで、本研究では、前述の圧延業界における様々な課題解決に応えるべく、特に現象理解が十分ではないエマルション圧延時の潤滑に着目し、そのメカニズムの解明に取り組んだ。そのた

め新たに2種類の手法を考案した。一つは、光干渉システムを備えたディスクオンボール試験機において、プレートアウトと油滴引き込み現象を個々に制御する評価手法である。これによりディスク/ボールの接触部の油膜厚測定と油膜生成挙動の観察を行った。もう一つは、実際の圧延における導入油膜測定方法として考案したトレーサ法であり、圧延ロールに付着するプレートアウト量との関係からロールバイトにおける油膜形成挙動について調査した。また、本研究で得られた知見をもとに、圧延業界の課題となっている潤滑性、表面性状制御の可能性についても言及した。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、現在の鉄鋼、軽圧の圧延業界における潤滑技術の現状とその重要性について述べた。また、過去の研究内容を把握することにより、理解が不足しているエマルジョン圧延における油導入メカニズムの解明の必要性について示した。

第2章では、光干渉システムを備えたディスクオンボール試験機によるO/Wエマルジョンの油膜形成挙動の調査について述べた。尚、従来のディスクオンボール試験とは異なり、新たにプレートアウト量とエマルジョン供給を個々に制御する手法を考案することにより、圧延におけるロールバイトの状況を模擬した。これにより、油滴の引き込み挙動観察や導入油膜厚の測定だけでなく、プレートアウトと油滴引き込みの関係やスターブ潤滑/フラッド潤滑と言われる潤滑油の過不足状態の影響も評価可能とした。フラッド潤滑状態の場合には、導入油膜厚の形成に油滴の引き込みはほとんど影響しないが、エマルジョン中の水に油膜厚を下げる効果があることを明らかにした。また、特に油量が少ない場合に水の影響が大きくなることを明らかにした。一方、スターブ潤滑状態の場合には、導入油膜厚の形成に油滴の引き込み効果が影響し、エマルジョン性状（濃度、粒径）によって導入油膜厚が変化することを明らかにした。さらに、回転速度が増加した場合、導入油膜厚が減少することを明らかにし、流れ解析からロールバイト入り口部の逆流が影響している可能性も示した。

上記ディスクオンボール試験機と実際の圧延では、材質の違い、圧力・速度等の実験条件、塑性変形の有無など異なる点が多数ある。そこで、第3章では、圧延における導入油膜測定方法としてトレーサ法を新たに考案し、圧延時のエマルジョン性状が導入油膜厚に与える影響について調査を行った。その結果、エマルジョン濃度は高いほど、エマルジョン粒径は大きいほど、導入油膜厚は増加し、速度によってその影響度は変化することを明らかにした。さらに、導入油膜厚の増減による接触状態の変化が圧延時の摩擦状態に影響していることも明らかにした。

ここで、第3章で求めた導入油膜に対応するプレートアウト量が判れば、両値の比較により実際の圧延時のプレートアウト、油滴引き込み、導入油膜の関係が明らかになると考えられる。そこで、第4章では、まず、圧延ロールに付着するプレートアウト量測定法を考案し、エマルジョン性状、圧延潤滑条件との関係を調査した。その結果、高濃度、大粒径ほどプレートアウト量は増加するが、圧延速度に対しては速度が速くなるほどプレートアウト量は減少することを明らかにした。さらに、トレーサ法によって求めた導入油膜厚からロールバイト入口部の油膜厚（入側油膜厚）の算出を試み、プレートアウトとの関係を調べた。その結果、圧延では入側油膜厚とプレートアウト量の関係は速度によって変化し、速度増加と共に油滴引き込み効果の影響が大きくなる可能性を明らかにした。

第5章では、2種類の導入油膜形成挙動調査によって明らかになった潤滑メカニズムに対し、小型圧延機による検証を行うと共に、実際の圧延における潤滑性、表面性状制御の可能性について調査した。まず、圧延機においてプレートアウトとエマルジョンを分離して評価する方法を考案し、検討を行った。その結果、高粘度油、或いは低粘度でも大粒径のエマルジョンを用いた場合には、速度が速いほどエマルジョン供給方法の影響が大きくなることが明らかになった。これは、前述のように、速度が速くなるほど油滴引き込みの影響が大きくなることを支持する結果である。一方、プレートアウト量が少ないエマルジョン条件では、低速であっても油滴引き込みの影響が現れることも明らかになった。

次に、エマルション条件による潤滑性、表面性状の制御可能性について検討を行った。その結果、高粘度油を用いた場合、圧延速度が速い方がエマルション濃度による潤滑性制御範囲は拡大することを示した。また、表面性状についても、低速に比べて高速の方が大きく変化することが明らかになった。これは、前述のように、高速の方が油滴の引き込み効果の影響が大きいために、エマルション条件の差も大きくなることを支持する結果であるが、実際の圧延においても、油滴の引き込み、プレートアウト、導入油膜の関係を考慮することで、圧延潤滑性や表面性状の制御が可能であることを示すものでもある。また、水の効果についても検証した結果、圧延においても水の供給により潤滑性や光沢度は低下することが明らかになった。さらに、界面活性剤を用いることによりその効果はより大きくなることも示した。これは、水による油膜除去効果が圧延においても生じていることを支持する結果である。また、これまでエマルション圧延では油条件に着目することが多かったが、水或いは界面活性剤の影響は無視できず、水の観点からも潤滑性や表面性状が制御できることを示した。

第6章では、各章の結果について総括し、実圧延への展開について述べた。

本研究では、これまで理解が十分ではなかったエマルション圧延時の潤滑メカニズムに対し、プレートアウト、油滴の引き込み、導入油膜の関係を明らかにすると共に、水あるいは界面活性剤による油膜削減効果も重要な要素であることを実験的に明らかにした。さらに、このメカニズムに基づいて、実際の圧延においても潤滑性や表面性状が制御可能であることを明らかにした。本研究で得られた知見は、国内外の鉄鋼、軽圧業界の圧延工程で生じている、潤滑に関連する技術課題解決において、操業指針や圧延油設計指針として活用が期待できるものである。